

文章编号:1007-9629(2024)04-0320-07

## 沥青复合阻燃抑烟剂的作用效果与协同机理

李晓超<sup>1</sup>, 刘圣洁<sup>1\*</sup>, 曾俐豪<sup>2</sup>, 王海名<sup>1</sup>, 林钰<sup>3</sup>

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098; 2. 广西交投集团有限公司广西道路结构与材料重点实验室, 广西南宁 530007; 3. 浙江交投高速公路运营管理有限公司, 浙江杭州 310000)

**摘要:**采用氢氧化铝、有机蒙脱土与可膨胀石墨复配阻燃抑烟剂,通过极限氧指数(LOI)法、烘箱恒温加热试验、热重分析、傅里叶变换红外光谱、扫描电镜及X射线能谱分析了复合阻燃抑烟剂对沥青的作用效果与协同机理。结果表明:复配剂的加入起到明显的阻燃抑烟效果,含量为6%的复配剂可将沥青的LOI值提升至25.19%,单位沥青烟气释放量减少70%;复配剂拓宽了单一助燃剂的作用温度范围,在沥青燃烧过程中吸收热量,稀释可燃气体浓度,不仅能够提升沥青的热稳定性,还可形成复合阻隔层,起到协同阻燃抑烟作用。

**关键词:**路面材料;阻燃抑烟;协同机理;氢氧化铝;有机蒙脱土;可膨胀石墨

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.04.005

## Effect and Synergistic Mechanism of Composite Flame Retardant and Smoke Suppressant for Asphalt

LI Xiaochao<sup>1</sup>, LIU Shengjie<sup>1\*</sup>, ZENG Lihao<sup>2</sup>, WANG Haiming<sup>1</sup>, LIN Yu<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Road Structure and Materials, Guangxi Jiaoke Group Co., Ltd., Nanning 530007, China; 3. Zhejiang Jiaotou Expressway Operation Management Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** Composite flame retardant and smoke suppressant was prepared by using aluminum hydroxide, organic montmorillonite and expandable graphite. By the limiting oxygen index(LOI) method, oven constant temperature heating, thermogravimetric analysis, Fourier infrared spectroscopy, scanning electron microscopy and X-ray energy spectrum were used to analyze the effect and synergistic mechanism of composite flame retardant and smoke suppressant for asphalt. The results show that the addition of the compound agent has obvious flame retardant and smoke suppression effect, 6% of the compound agent can increase the LOI value of asphalt to 25.19%, and the unit asphalt smoke release amount is reduced by 70%. The compound agent broadens the temperature range of the single combustion promoter. It absorbs heat and dilutes the concentration of combustible gas during the combustion of asphalt. It not only improves the thermal stability of asphalt, but also forms a composite barrier layer, which plays a synergistic flame retardant and smoke suppression role.

**Key words:** pavement material; flame retardant and smoke suppression; synergistic mechanism; aluminum hydroxide; organic montmorillonite; expandable graphite

传统热拌沥青混合料在生产施工过程中会释放大 量烟气,造成能源耗费和环境污染。在隧道等封闭路

收稿日期:2022-05-29; 修订日期:2022-07-31

基金项目: 广西省重点研发计划项目(桂科 AB20297033, 桂科 AB23026144); 国家自然科学基金资助项目(51908194); 江西省交通运输厅科技项目(2023H0001)

第一作者: 李晓超(1999—), 女, 山西朔州人, 河海大学硕士生. E-mail: 1025032564@qq.com

通讯作者: 刘圣洁(1985—), 男, 河南商丘人, 河海大学副教授, 硕士生导师, 博士. E-mail: lsjwork@126.com

段内,交通事故诱发火灾时易造成沥青路面热分解和燃烧.随着“双碳计划”落地的实施和人们对健康安全理念的重视,降低沥青路面施工过程中的烟气排放,提升突发火灾时沥青的阻燃抑烟性能,已成为当前研究热点.

目前,应用较多的沥青阻燃材料主要有氢氧化铝(ATH)、可膨胀石墨(EG)、有机蒙脱土(OMMT)、聚磷酸铵和光催化材料等<sup>[1-2]</sup>.其中ATH来源丰富、价格较低,但需要较高掺量才能发挥较好作用<sup>[3]</sup>;EG轻质多孔、绿色环保,具有较好的吸附性和温度稳定性<sup>[4]</sup>;OMMT有利于沥青大分子插层,具备一定的阻燃抑烟性能<sup>[5]</sup>.已有研究发现,单一阻燃剂难以达到理想的阻燃效果,采用两种或多种阻燃剂进行复配已成为当前研究的主要方向<sup>[6-10]</sup>.

鉴于此,本研究以ATH、OMMT和EG为原材料,复配无机-有机三系复合阻燃抑烟剂,同时在沥青中加入温拌剂Sasobit<sup>[11]</sup>,通过极限氧指数(LOI)法和烘箱恒温加热试验,评价该复合阻燃抑烟剂的阻燃及抑烟效果;综合热重分析(TG)和傅里叶变换红外光谱(FTIR)、扫描电镜(SEM)和X射线能谱分析(EDS),探明复合阻燃抑烟剂的作用效果和协同机理.

## 1 试验

### 1.1 原材料

沥青选用SBS改性沥青,25℃针入度为5.5 mm,5℃延度为31 cm,软化点为68℃.温拌剂采用Sasobit.复合阻燃抑烟剂中ATH平均粒径为5.1 μm,Na<sub>2</sub>O含量(质量分数,下同)为0.200%,SiO<sub>2</sub>含量为0.015%,分解温度范围为210~900℃;EG密度为1.2 g/cm<sup>3</sup>,分解温度范围为220~460℃;OMMT密度为1.7 g/cm<sup>3</sup>,层间距( $d_{001}$ )为3.5 nm,分解温度范围为200~600℃.

### 1.2 温拌阻燃抑烟沥青的制备

(1)依据文献<sup>[12-13]</sup>,将3种阻燃抑烟材料以 $m(\text{ATH}):m(\text{OMMT}):m(\text{EG})=6:2:3$ 的质量比混合均匀,得到三系复合阻燃抑烟剂,简称AOE.

(2)将SBS改性沥青加热到165℃后投入2% Sasobit,并使用高速剪切仪以1 000 r/min的转速剪切15 min;再次加热到150℃,分别加入沥青质量0%、4%、6%、8%和10%的AOE,匀速搅拌10 min;之后先以4 500 r/min的转速剪切45 min,再以1 000 r/min的转速继续剪切10 min,即制备得到试验用温拌阻燃抑烟沥青试样,分别编号为AOE-0、AOE-4、AOE-6、AOE-8和AOE-10.

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 LOI试验

将150.0 mm×150.0 mm的玻璃纤维表面毡,置于内腔尺寸为151.0 mm×151.0 mm×3.0 mm的金属模具框内,把加热后的阻燃抑烟沥青浇洒于玻璃纤维毡上并浸透,待其冷却后脱模,裁剪成尺寸为6.5 mm×151.0 mm×3.0 mm的长条试样.按照NB/SH/T 0815—2010《沥青燃烧性能测定 氧指数法》对沥青的LOI值进行测试.

#### 1.3.2 烘箱恒温加热试验

鉴于国内外对于沥青烟气的排放与检测尚无标准,本研究自主设计了烘箱恒温加热法.取5种阻燃抑烟沥青试样各50 g置于称重后的铁质空容器中,一起放入烘箱,烘箱温度设置为220℃,加热6 h,每间隔1 h称重并记录试样的质量数据,以分析其质量变化情况.

#### 1.3.3 热重分析试验

使用NETZSCH STA 449 F3型热重分析仪,设定气体流量为35 mL/min、初始温度为20℃,并以10 K/min的速率升温至800℃,对沥青试样开展热重分析.

#### 1.3.4 傅里叶变换红外光谱试验

采用溴化钾涂片法,在中红外区的波数范围(4 000~400 cm<sup>-1</sup>)对沥青试样进行红外扫描,分析波动峰的位置和强弱度.

#### 1.3.5 扫描电镜与X射线能谱试验

使用ZEISS Gemini SEM 300型电子显微镜,设置电镜倍数为10 000、2 000倍,对各沥青试样及燃烧后的残炭进行微观结构观察;结合Horiba 7021-H型X射线能谱仪,采用点析法进行元素分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 LOI

图1为各AOE掺量下阻燃抑烟沥青的LOI值.由图1可见:(1)阻燃抑烟沥青的LOI值随着AOE掺量的增加而增大,其中,当AOE掺量从0%增加到4%时,LOI值变化最为明显;当AOE掺量从4%增加到10%时,LOI值变化幅度较小.(2)试样AOE-4、AOE-6、AOE-8和AOE-10的LOI值分别为24.59%、25.19%、25.49%和25.65%,均满足NB/SH/T 0820—2010要求.这表明AOE的加入能够改善阻燃抑烟沥青的阻燃效果,且AOE掺量越大,改善效果越好.

### 2.2 烘箱恒温加热

图2为各AOE掺量下阻燃抑烟沥青的质量损

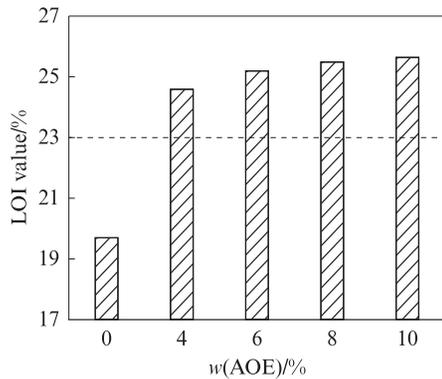


图1 各AOE掺量下阻燃抑烟沥青的LOI值

Fig. 1 LOI values of flame retardant and smoke suppression asphalts at different AOE contents

失.由图2可见:(1)阻燃抑烟沥青的质量损失主要发生在1~4 h,4 h后阻燃抑烟沥青的质量损失速率有所减缓,5 h达到峰值后阻燃抑烟沥青的质量损失基本维持不变.(2)AOE掺量越高,阻燃抑烟沥青的质量损失越少;与试样AOE-0相比,试样AOE-4、AOE-6、AOE-8和AOE-10的质量损失分别减少64.71%、70.60%、78.40%和82.35%.这是因为在一定的加热条件下,沥青组分裂解生成CO、CO<sub>2</sub>、硫氧化物(SO<sub>x</sub>)和挥发性有机化合物(VOC<sub>s</sub>)等,它们均以沥青烟气的形式挥发释出<sup>[14-15]</sup>.由此可认为阻燃抑烟沥青的质量损失近似等于生烟量<sup>[16]</sup>.

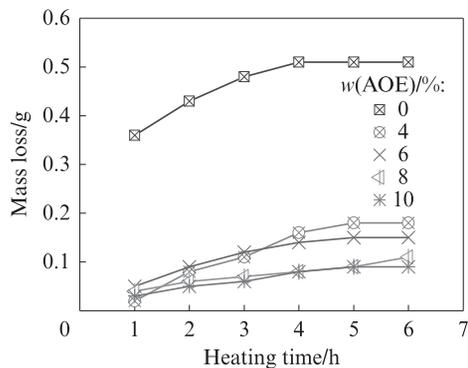


图2 各AOE掺量下阻燃抑烟沥青的质量损失

Fig. 2 Mass loss of flame retardant and smoke suppression asphalts at different AOE contents

采用沥青试样的初始质量与加热6 h后的质量损失来计算单位阻燃抑烟沥青的烟气释放量,并进行非线性拟合得到二者的指数回归方程,结果如图3所示.由图3可见:单位阻燃抑烟沥青的烟气释放量随着AOE掺量的增加而减少;相较试样AOE-0,试样AOE-4、AOE-6、AOE-8和AOE-10的单位阻燃抑烟沥青烟气释放量分别减少64%、70%、78%和82%.

结合烘箱恒温加热和LOI的试验结果,同时考

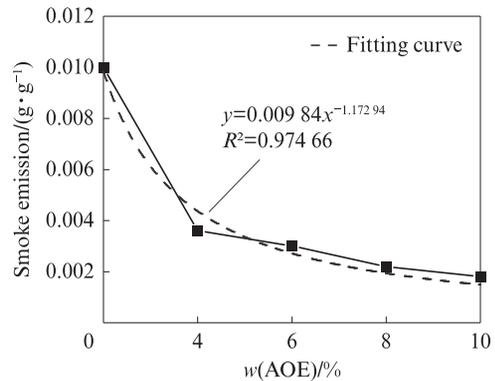


图3 单位阻燃抑烟沥青的烟气释放量

Fig. 3 Smoke emission of unit flame retardant and smoke suppression asphalts

虑经济性,本研究将AOE的最佳掺量范围确定为4%~8%.后续试验以试样AOE-0为对照组,对试样AOE-4、AOE-6和AOE-8展开进一步研究.

### 2.3 热重分析

图4为阻燃抑烟沥青的TG曲线.由图4可见:(1)4种AOE掺量下,各阻燃抑烟沥青的TG曲线变化规律相近.(2)阻燃抑烟沥青的热分解过程分为三个阶段——0~405℃为第1阶段,随着温度的升高,阻燃抑烟沥青的质量有一定程度增加;405~485℃为第2阶段,阻燃抑烟沥青的质量出现“断崖式”跌落;485~800℃为第3阶段,阻燃抑烟沥青的质量在485℃之后逐渐趋于平稳,不再有明显减少.这是因为在试验初期炉体内气体环境还未达到稳定状态,材料在高温下可能会氧化增重,沥青分子结构中的C=C双键氧化老化后,生成含有羰基结构的组分<sup>[17]</sup>;随着温度的不断升高,沥青各组分燃烧分解重组,胶质侧链断裂,生成大量气体<sup>[18]</sup>,与其他轻质组分一同挥发,导致其质量急速衰减;待最后一阶段的反应结束后,沥青质量才趋于稳定,此时的剩余质量可

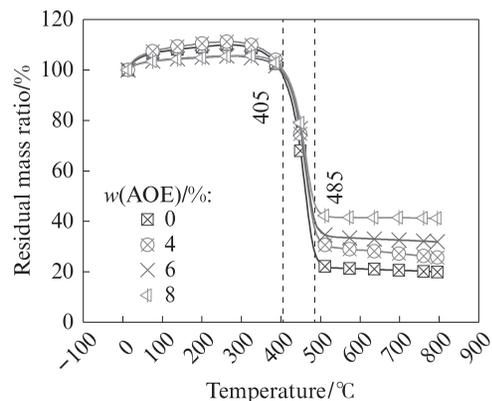


图4 阻燃抑烟沥青的TG曲线

Fig. 4 TG curves of flame retardant and smoke suppression asphalts

认为是阻燃抑烟沥青燃烧热分解后的残重。

由图4还可见,相比0℃时,试样AOE-0、AOE-4、AOE-6和AOE-8在最后燃烧阶段(800℃)的质量损失率分别为80.15%、75.33%、67.15%和59.2%。将阻燃抑烟沥青的质量损失大致归结于沥青烟气的释放,试验结果表明,随着AOE掺量的增加,沥青烟气的释放量减少,说明AOE在沥青的热分解中发挥了阻燃抑烟作用,且AOE掺量越高,抑烟效果越好。

隧道等封闭环境发生火灾时温度一般最高为1000℃<sup>[19]</sup>,阻燃抑烟沥青的TG曲线显示,AOE的作用温度范围覆盖了沥青燃烧分解全过程,能够起到阻燃抑烟效果。

## 2.4 傅里叶变换红外光谱

图5为阻燃抑烟沥青的FTIR图谱。由图5可见:(1)在2923、1457 cm<sup>-1</sup>处有明显的特征峰,添加AOE前后各沥青对应曲线的出峰位置较为相似,分别在741、1031、1265、3621 cm<sup>-1</sup>处出现新的吸收峰。(2)2923、1457 cm<sup>-1</sup>处的峰为SBS改性生成的特征峰<sup>[20]</sup>;741 cm<sup>-1</sup>处为芳氢面的外弯曲与环骨架的振动;1031 cm<sup>-1</sup>处为Si—O—Si键的伸缩振动;1265 cm<sup>-1</sup>处为CH<sub>3</sub>基团中C—H的伸缩振动;3621 cm<sup>-1</sup>处为游离状态的—OH或N—H的伸缩振动。新出现的4处吸收峰均为AOE组分,并非化学改性生成的新官能团。这表明AOE的添加对温拌SBS改性沥青主要以物理改性为主。

## 2.5 扫描电镜照片

图6为阻燃抑烟沥青的SEM照片。由图6可见:

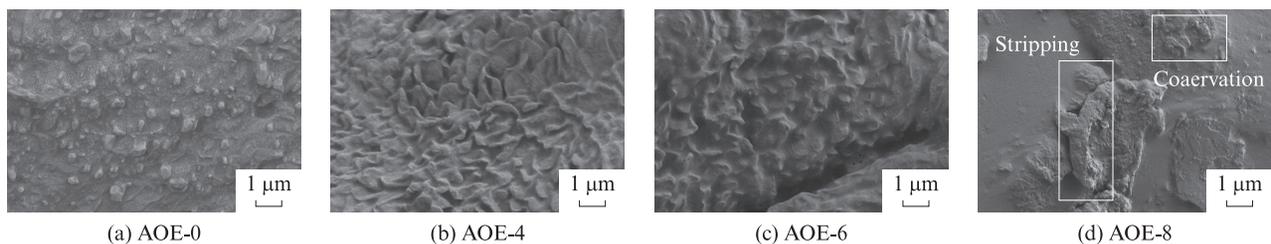


图5 阻燃抑烟沥青的FTIR图谱

Fig. 5 FTIR spectra of flame retardant and smoke suppression asphalts

图6 阻燃抑烟沥青的SEM照片

Fig. 6 SEM images of flame retardant and smoke suppression asphalts

综合考虑后,推荐AOE的最佳掺量为6%。取试样AOE-0和AOE-6燃烧后的残炭进行SEM观察,照片如图7所示。由图7可见:(1)AOE-0的残炭试样呈现碎小颗粒团状形态且表面松散多孔。这是由于在燃烧过程中沥青材料发生了分解迁移,轻质组分溢出释放到外界所致。(2)试样AOE-6燃烧后表面由褶皱形态转变为水平裹覆的大块片状形态,推测该

(1)试样AOE-0表面均匀吸附着颗粒状物体,该颗粒物体为SBS研磨颗粒,其分布越均匀,改性剂在沥青中的分散性就越好。(2)试样AOE-4和AOE-6的表面结构发生了变化——试样AOE-4表层褶皱呈清晰的弯曲插片状,突起高度明显;试样AOE-6表层褶皱更加连续,分布也更加均匀。这是由于阻燃抑烟沥青在制备过程中经过加热与高速剪切后,AOE被均匀分散到沥青中,其中的EG和OMMT与沥青材料之间形成了插层-剥离共融体系<sup>[21]</sup>,使得材料表面由简单的小颗粒吸附状转变为细密褶皱状。(3)试样AOE-8表面凹凸不平,出现了不规则塌陷与粗糙的丘状隆起,显示出“团聚”现象,个别区域还出现了剥离状态,表明掺入过量的AOE导致沥青稳定性变差。这是由于AOE呈粉末质地,当掺量过多时无法有效地分散于沥青中,从而导致材料间的相容性变差。

片状物质为AOE在沥青燃烧过程中受热分解后发生迁移,聚集到表层所形成的复合阻隔层。(3)AOE-6残炭试样中的大块片状物长度是AOE-0残炭试样表面颗粒团状物长度的近2.7倍,且大块片状物交错重叠、裹覆连续,表面致密无气孔,这可能是AOE形成的复合阻隔层有效阻断了沥青燃烧及气体释放,从而达到阻燃抑烟效果的原因。

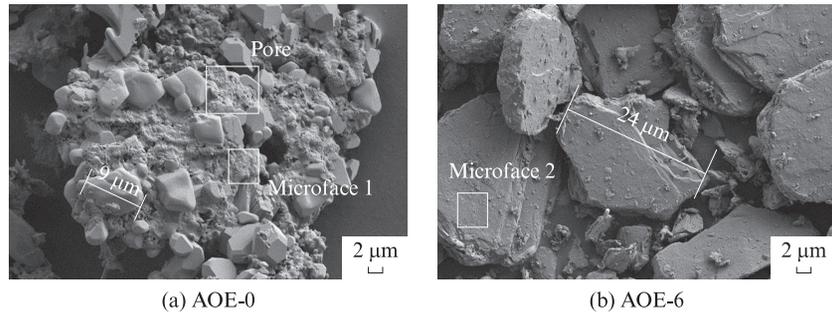


图7 AOE-0和AOE-6残炭的SEM照片

Fig. 7 SEM images of char residues of AOE-0 and AOE-6

## 2.6 X射线能谱

选取图7中的微面(“Microface 1”和“Microface 2”),对其进行EDS分析,结果如图8所示.由图8可见:(1)试样AOE-0燃烧后,残炭表面物质的主要元素为C、S和O,这是因为沥青组分中含有大量的C元素及少量的S、O元素,燃烧分解后仍有一部分作为残留灰烬聚集结团;AOE-0残炭试样中存在如Cr、

Ca和V等其他微量金属元素,这是样品室内试验器材干扰及试样纯度影响所致.(2)试样AOE-6燃烧后,残炭表层物质中除C和O元素之外还出现了大量Si、Al及少量Na、K元素.结合SEM分析结果可知,残炭表层物质主要是AOE的燃烧分解产物所形成的复合阻隔层,其富含Si、O、C、Al元素及少量Na、K金属元素.

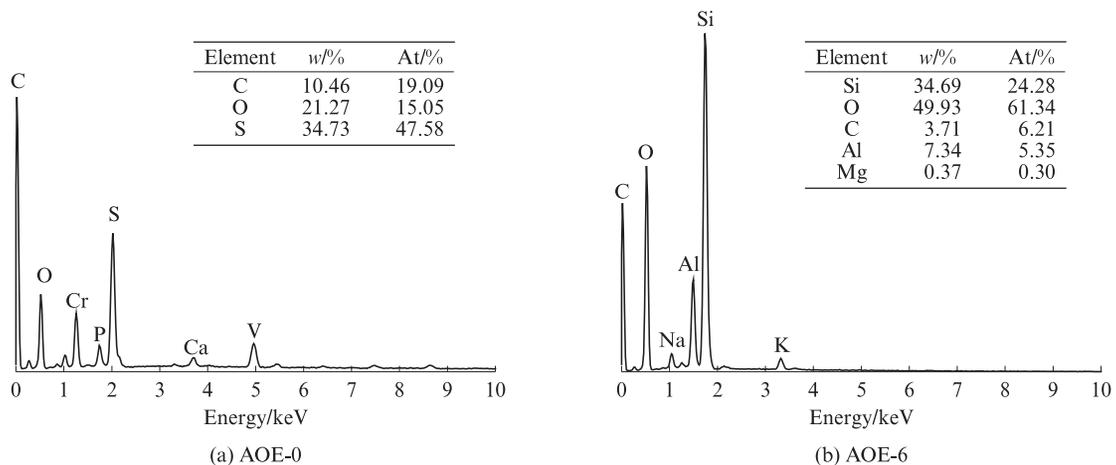


图8 AOE-0和AOE-6残炭微面的EDS图谱

Fig. 8 EDS spectra of char residues microface of AOE-0 and AOE-6

由图8中的表格数据可知:沥青材料中加入AOE后,其残炭表面O元素的质量分数增加28.66%,而C元素的质量分数减少6.75%.这是因为一方面AOE形成的复合阻隔层组分中富含ATH和OMMT分解反应生成的含氧物质,导致沥青燃烧后残炭表面O元素的质量分数增加;另一方面复合阻隔层将沥青完全覆盖,表面其他元素增多可能会导致C元素的质量分数减少.

## 3 AOE的协同阻燃抑烟机理

结合试验结果绘制AOE的协同阻燃抑烟机理示意图,如图9所示.

由图9(a)可见:在沥青燃烧前,因制备过程中高速剪切产生的热运动和机械运动,导致EG和

OMMT与沥青中的组分形成插层-剥离共融体系.该体系除了增加沥青黏度外,还在沥青聚合物中形成更好的空间网状结构,通过束缚SBS分子链和沥青分子的相对运动,抑制了易燃组分的传递,从而提高了SBS改性沥青的高温性能和阻燃性能.

由图9(b)可见:在沥青燃烧过程中,ATH和EG通过吸热降低了环境温度且ATH生成的水蒸气能够稀释可燃气体浓度,OMMT受热分解后增强了沥青的稳定性,因此AOE的掺入减缓了沥青的燃烧程度;同时,ATH分解生成 $Al_2O_3$ ,OMMT开裂后在气泡运动的驱动力下迁移聚集成硅铝酸盐层,EG形成蓬松石墨屏障.这三者一方面阻隔了热量的传递,另一方面吸附或阻隔烟气,从而在阻断燃烧的过程中有效减缓了有害气体的释出.

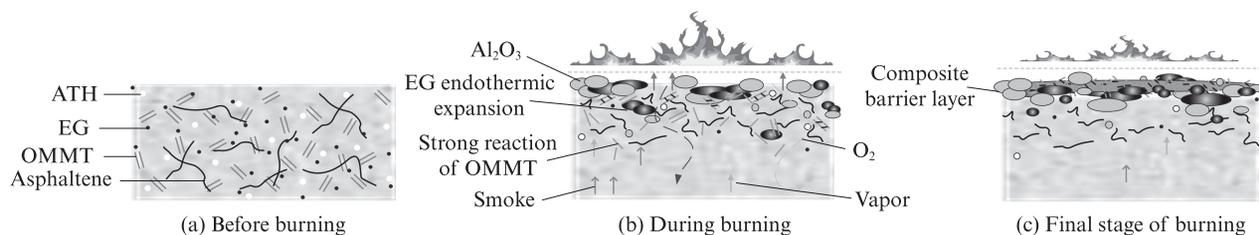


图9 AOE的协同阻燃抑烟机理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of synergistic mechanism Flame retardant smoke suppression of AOE

由图9(c)可见,在燃烧的最后阶段,AOE分解形成多层紧密厚实的三系复合阻隔层,互补覆盖,阻断了沥青的燃烧及烟气的释放,达到阻燃抑烟效果。AOE分解生成的多种产物能够持续长期互补配合,拓展各组分发挥效用的温度区间,有效地弥补了单层炭层薄弱易脱落的不足,发挥了良好的协同阻燃抑烟作用。

## 4 结论

(1) 采用氢氧化铝(ATH)、有机蒙脱土(OMMT)和可膨胀石墨(EG)复配的无机-有机三系阻燃抑烟剂(AOE)能够提升沥青的阻燃抑烟性能。考虑经济性,推荐AOE掺量为6%,由此制备得到阻燃抑烟沥青AOE-6,其极限氧指数(LOI)值增至25.19%,能够抑制70%的单位沥青烟气释放量;且AOE的作用温度范围能够覆盖沥青燃烧分解的全过程,充分发挥阻燃抑烟作用。

(2) AOE能够提升沥青结构的稳定性,使沥青表面呈现均匀褶皱形态;沥青燃烧后,AOE分解残留物,形成致密片状物,裹覆在残炭表面,使残炭表面O元素的质量分数增加28.66%,C元素的质量分数减少6.75%。

(3) ATH、OMMT和EG在不同的作用温度区间反应分解,相互配合,实现了气相稀释、固相凝聚和物理吸附等多种效应。一方面弥补了单种材料温度区间较小的缺点;另一方面反应生成物相互配合,形成三系复合阻隔层,弥补了单层阻隔层薄弱易剥落的缺点,阻断了烟气释放与燃烧的进一步发展。

## 参考文献:

[1] 鲍金奇,王浩轩,丛玉凤,等.道路沥青抑烟剂的研究进展[J].当代化工,2020,49(5):988-992.  
BAO Jinqi, WANG Haoxuan, CONG Yufeng, et al. Research progress on road asphalt smoke suppressants [J]. Contemporary Chemical, 2020, 49(5):988-992. (in Chinese)

[2] 张通,闫治国,杨正龙,等.阻燃聚合物改性水泥基复合板材

的防火性能[J].建筑材料学报,2021,24(2):333-338.

ZHANG Tong, YAN Zhiguo, YANG Zhenglong, et al. Fire resistance of flame retardant polymer modified cement-based composite plate [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2): 333-338. (in Chinese)

[3] 黄志义,武斌,康诚,等.复合氢氧化物改性沥青阻燃和路用性能[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(1):27-32.

HUANG Zhiyi, WU Bin, KANG Cheng, et al. Flame retardant and road performance of composite hydroxide modified asphalt [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(1):27-32. (in Chinese)

[4] 孙吉书,李文霞,李宁利,等.可膨胀石墨/氢氧化铝复合抑烟沥青制备及机理分析[J].大连理工大学学报,2022,62(4):386-393.

SUN Jishu, LI Wenxia, LI Ningli, et al. Preparation and mechanism analysis of expandable graphite / aluminum hydroxide composite smoke suppression asphalt [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2022, 62(4):386-393. (in Chinese)

[5] YANG X L, SHEN A Q, SUN Y X, et al. Effects of alumina trihydrate (ATH) and organic montmorillonite (OMMT) on asphalt fume emission and flame retardancy properties of SBS-modified asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2020, 236:117576.

[6] 朱凯,唐大全,黄亚东,等.ZnMgAl-CO<sub>3</sub>-LDHs的沥青阻燃抑烟性能与机理分析[J].建筑材料学报,2019,22(4):599-605.  
ZHU Kai, TANG Daquan, HUANG Yadong, et al. Analysis of flame retardant and smoke suppression properties and mechanism of ZnMgAl-CO<sub>3</sub>-LDHs asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4):599-605. (in Chinese)

[7] 路建强,杜傲伟,柳伟,等.两种沥青路面阻燃剂的阻燃效果研究[J].有色金属材料与工程,2023,44(1):75-84.

LU Jianqiang, DU Aowei, LIU Wei, et al. Study on the flame retardant effect of two kinds of asphalt pavement flame retardants [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2023, 44(1): 75-84. (in Chinese)

[8] 陈辉强,郑智能,郭鹏,等.硼酸锌对隧道阻燃沥青的阻燃增效作用及机理[J].建筑材料学报,2017,20(4):635-639,645.  
CHEN Huiqiang, ZHENG Zhineng, GUO Peng, et al. The flame retardant synergistic effect and mechanism of zinc borate on tunnel flame retardant asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(4):635-639,645. (in Chinese)

[9] 杨小龙,申爱琴,蒋宜馨,等.基于阻燃抑烟的纳米黏土改性沥青综述[J].交通运输工程学报,2021,21(5):42-61.

YANG Xiaolong, SHEN Aiqin, JIANG Yixin, et al. Review of

- nano-clay modified asphalt based on flame retardant and smoke suppression [J]. *Transportation Engineering Journal*, 2021, 21(5):42-61. (in Chinese)
- [10] XIA W J, ZHOU X Y, YANG X Y. Suppressive effects of composite flame retardant on smoke release, combustion soot and residue constituents of asphalt mixture [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2022, 103:60-71.
- [11] 徐加秋, 阳恩慧, 罗浩原, 等. 基于温度应力的温拌沥青胶结料低温力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(1):70-76.  
XU Jiaqiu, YANG Enhui, LUO Haoyuan, et al. Low temperature mechanical properties of warm mix asphalt binder based on temperature stress [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(1):70-76. (in Chinese)
- [12] 林钰, 刘圣洁, 黄慧, 等. 基于流变特性的温拌阻燃沥青的高、低温性能[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(4):483-489.  
LIN Yu, LIU Shengjie, HUANG Hui, et al. High and low temperature properties of warm mix flame retardant asphalt based on rheological properties [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science)*, 2023, 44(4):483-489. (in Chinese)
- [13] TAO X, WANG Y, XIA W J, et al. Effects of flame retardants on thermal decomposition of SARA fractions separated from asphalt binder[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 173:209-219
- [14] LI N, JIANG Q, WANG F S, et al. Emission behavior, environmental impact and priority-controlled pollutants assessment of volatile organic compounds (VOCs) during asphalt pavement construction based on laboratory experiment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 398:122904.
- [15] FEDERICO A, FEDERICA B, FELICE G. Airborne emissions of asphalt/wax blends for warm mix asphalt production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164:749-756.
- [16] 刘莹. 沥青烟气定量评价方法发展现状[J]. *化工管理*, 2019(31):137-138.
- LIU Ying. Development status of quantitative evaluation methods for asphalt flue gas [J]. *Chemical Management*, 2019(31):137-138. (in Chinese)
- [17] 余嫒. 沥青挥发性有机化合物(VOC)的释放及其对沥青性能的影响[D]. 武汉:武汉理工大学, 2012.  
YU Man. The release of volatile organic compounds (VOC) from asphalt and its effect on asphalt performance [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [18] 夏文静. 隧道火灾下沥青路面燃烧行为及复合阻燃剂协同抑制机理[D]. 南京:南京林业大学, 2020.  
XIA Wenjing. Combustion behavior of asphalt pavement under tunnel fire and synergistic inhibition mechanism of composite flame retardants [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2020. (in Chinese)
- [19] 杜永潇, 孙晓立, 杨军, 等. 盾构隧道火灾损伤技术状况检测与鉴定研究[J]. *现代隧道技术*, 2023, 60(2):260-270.  
DU Yongxiao, SUN Xiaoli, YANG Jun, et al. Fire damage detection and identification of shield tunnel [J]. *Modern Tunnel Technology*, 2023, 60(2):260-270. (in Chinese)
- [20] 崔亚楠, 崔树宇, 郭立典. 废机油再生SBS改性沥青的性能及机理[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(2):164-170.  
CUI Yanan, CUI Shuyu, GUO Lidian. Performance and mechanism of SBS modified asphalt regenerated by waste engine oil [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(2):164-170. (in Chinese)
- [21] 黄刚, 何兆益, 周超, 等. 膨胀石墨抑制沥青烟机理与抑烟沥青混合料动态性能[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(10):1-10.  
HUANG Gang, HE Zhaoyi, ZHOU Chao, et al. The mechanism of expanded graphite inhibiting asphalt smoke and the dynamic performance of smoke suppression asphalt mixture [J]. *China Journal of Highways*, 2015, 28(10):1-10. (in Chinese)